

На правах рукописи

ИСЛАМОВ Камиль Фаритович

**ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Набережные Челны - 2007

Работа выполнена на кафедре «Технология строительного производства» Камской государственной инженерно-экономической академии, г. Набережные Челны.

Научный руководитель:	Доктор физико-математических наук, профессор СИБГАТУЛЛИН Эмер Сулейманович
Официальные оппоненты:	Доктор физико-математических наук, профессор КАЮМОВ Рашит Абдулхакович. Кандидат технических наук, доцент ЗАМАЛИЕВ Фарит Сахапович
Ведущая организация:	Республиканское научно- производственное строительное обьединение

Защита состоится 31 мая 2007 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.077.01 Казанского государственного архитектурно-строительного университета по адресу: 420043 г. Казань, ул. Зеленая, 1, КазГАСУ, ауд. В-209.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

Автореферат разослан 30 апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Сулейманов А.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В связи с перестройкой народного хозяйства Российской Федерации, в настоящее время наблюдается бурное развитие строительства объектов по индивидуальным проектам, с оригинальными конструктивными элементами сложной формы. Тонкие пластины и оболочки (из армированных и неармированных материалов) представляют собой важные элементы строительных конструкций. Сложные форма оболочки или пластины, конфигурация внешних нагрузок, краевые условия, характер армирования и т.п., создают значительные трудности перед проектировщиками на пути создания ими рациональных конструкций. Эксперименты показывают, что во многих случаях разрушение пластин и оболочек (в частности – железобетонных) идет по определенным линиям, области между которыми не разрушаются и не претерпевают пластических деформаций. Традиционные методы дискретизации (например, метод конечных элементов) неудобны для описания таких деформаций конструкции, когда некоторые её части перемещаются как жесткие элементы. С другой стороны, использование только теории упругости в расчетных моделях, сильно сужает их возможности.

Из вышеизложенного вытекает, что развитие методов расчета на прочность тонких пластин и оболочек (на базе теории пластичности с использованием уточненных критериев прочности для конструкций), пригодных для решения сложных практических задач, является актуальной проблемой.

Цель и задачи работы.

Целью работы является разработка методики определения несущей способности тонких (армированных и неармированных) пластин и оболочек на основе модифицированного варианта кинематического метода. Методика должна позволять определять минимальное значение верхней

оценки разрушающей нагрузки при следующих особенностях задач: оболочки и пластины могут иметь сложную геометрическую форму, в том числе – изломы по некоторым линиям, внутренние и внешние (около краев) вырезы. Линии излома, вырезы имеют произвольный характер; допускаются к рассмотрению всевозможные условия опирания оболочек и пластин; внешняя статическая нагрузка может иметь произвольную конфигурацию; в общем случае должна учитываться работа всех внутренних силовых факторов в рассматриваемых сечениях оболочек и пластин; на характер армирования материала накладываются минимальные ограничения. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: построить уточненные кривые прочности для армированных тонких пластин и оболочек; разработать соответствующие алгоритмы и программы для реализации разработанной методики; провести численные эксперименты, осуществить их критический анализ.

Научную новизну работы представляют следующие результаты:

1. Разработана уточненная методика определения несущей способности тонких пластин и оболочек. Учтена совместная работа всех внутренних сил и моментов в общем случае сложного сопротивления конструкции.
2. Построены уточненные кривые прочности для слоистых армированных пластин и оболочек.
3. Созданы эффективные алгоритмы, реализующие разработанную методику. Эти алгоритмы позволяют: целенаправленно достичь необходимого уточнения используемых сечений гиперповерхности прочности (определяемых численно); уточнить положения сосредоточенных линий разрушения на поверхности приведения S_0 оболочки (пластины), количество этих линий, соответственно, кинематически возможный механизм разрушения элемента конструкции.

4. Разработаны и реализованы программы для ЭВМ, которые позволяют решать задачи определения несущей способности тонких армированных пластин и оболочек, когда они имеют сложную геометрию, всевозможные краевые условия, армированы произвольным образом и подвержены статическим нагрузкам произвольной конфигурации.

Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановки задач определения несущей способности тонких пластин и оболочек и методов их решения, и подтверждаются сравнением полученных соискателем численных результатов с известными в научной литературе соответствующими теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

Практическую ценность работы составляют:

- уточненная методика определения несущей способности тонких пластин и оболочек, позволяющая получать альтернативные (по отношению к существующим методикам расчетов) решения рассматриваемых задач и полезная для получения предварительных проектных решений;
- метод построения уточненных кривых прочности для армированных материалов;
- алгоритмы и программы для ЭВМ, позволяющие вести расчет и проектирование тонких пластин и оболочек с учетом исходных данных и условий задач, возникающих из потребностей строительной практики.

На защиту выносятся следующие результаты диссертации:

- новая уточненная методика определения несущей способности тонких пластин и оболочек;
- метод уточнения предельных кривых для армированных материалов;
- алгоритмы и программы для ЭВМ, позволяющие решать задачи определения несущей способности тонких пластин и оболочек и допуска-

- ющие возможность учета широкого спектра исходных данных и условий рассматриваемых задач;
- численные эксперименты, полученные с использованием этих алгоритмов и программ и демонстрирующие их возможности.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях Камской государственной инженерно-экономической академии в период с 2003 по 2006 г.г.; на X юбилейной Международной научно-технической конференции при X специализированной выставке "Строительство. Коммунальное хозяйство - 2005" "ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ" 1-3 марта 2006 г., г. Уфа; на 58-й республиканской научной конференции по проблемам архитектуры и строительства, 4-14 апреля 2006, г. Казань.

Публикации. По теме исследований опубликовано 11 печатных работ (1 работа в журнале из списка ВАК). В автореферате приводится список публикаций, содержащий 11 наименований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, включающего в себя обзор литературы, четырех разделов, заключения и выводов, библиографического списка, включающего в себя 145 наименований. Изложена на 209 страницах машинописного текста, содержит 94 рисунка, 63 таблицы.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Технология строительного производства» Камской государственной инженерно-экономической академии в соответствии с планом научно-исследовательских работ академии.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дана общая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследова-

ний. Проведен анализ существующих подходов к определению несущей способности пластин и оболочек методами теории предельного равновесия. В создание основ теории пластичности и общих методов расчета конструкций с учетом пластических свойств материалов внесли вклад такие ученые, как А.А. Гвоздев, А.С. Дехтярь, Д. Друккер, М.И. Ерхов, А.А. Ильюшин, Д.Д. Ивлев, Л.М. Качанов, Р.А. Каюмов, В.Д. Ключников, Ю.Р. Лепик, Р.М. Мансуров, Н.Н. Малинин, Р. Мизес, Ю.В. Немировский, В. Олышак, Б.Е. Победря, В. Прагер, Ю.Н. Работнов, А.Р. Ржаницын, В.И. Розенблюм, А. Савчук, И.Г. Терегулов, Ф. Ходж, Г.С. Шапиро, С.А. Шестериков и др.

Теории расчета многослойных оболочек посвящена весьма обширная литература, обзор которой проводили И.Ф. Образцов, С.А. Амбарцумян, В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков, В.В. Васильев, Э.И. Григолюк, Г.М. Куликов, Ю.В. Немировский, Б.С. Резников, В.В. Пикуль, и др.

Развитием теории железобетонных конструкций в разное время занимались В.Н. Байков, В.М. Бондаренко, В.З. Власов, А.А. Гвоздев, Г.А. Гениев, Н.И. Карпенко, В.И. Колчунов, А.М. Овечкин, Ю.Р. Седых, С.Н. Семененок, Э.Е. Сигалов, Б.С. Соколов, И.А. Трифонов, Г.Н. Шоршнев, М.А. Эпштейн и др.

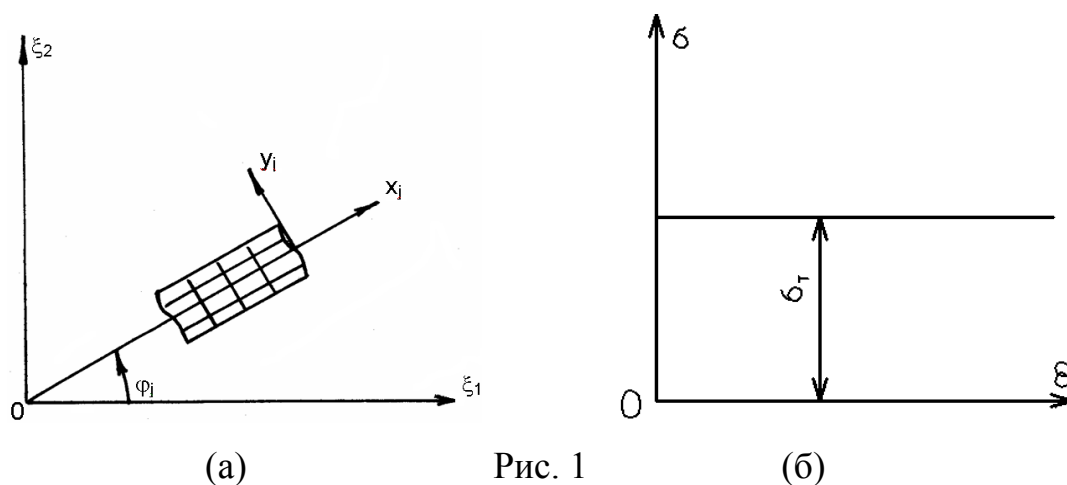
Первый раздел работы содержит основные положения теории предельного равновесия жесткопластического тела. Описаны такие основные понятия и принципы, как поверхность нагружения, жесткопластическая модель деформируемого твердого тела, поверхность текучести, выпуклость поверхности нагружения, принцип максимума Мизеса и постулат Друккера, ассоциированный закон деформирования. Приведены содержания статической и кинематической теорем об экстремальных свойствах предельных состояний деформирования, впервые сформулированных и доказанных, в достаточно общем виде, А.А. Гвоздевым. С целью улучшения верхней оценки разрушающей нагрузки, рассматриваемые

соответствующие задачи сводятся к стандартной задаче линейного программирования. Приведен пример определения минимальной верхней оценки разрушающей нагрузки для прямоугольной железобетонной плиты при учете работы только внутренних изгибающих моментов.

Второй раздел работы посвящен критериям прочности и пластичности для тонких анизотропных и композитных пластин и оболочек. Приведены краткие сведения о некоторых известных условиях прочности (в напряжениях) для изотропных и анизотропных материалов, а также краткие сведения о тонких оболочках и пластинах. Предполагается, что композитный материал оболочки (пластины) образован путем наложения (намотки) n совместно работающих ортотропных слоев, эквидистантных некоторой поверхности S_0 . Проскальзывание между слоями отсутствует. Для произвольного слоя с номером j ($j = \overline{1, n}$) в системе координат $(xyz)_j$ уравнение предельной поверхности (поверхности прочности) описывается следующим уравнением:

$$(a\sigma_{xx}^2 + 2b\sigma_{xx}\sigma_{yy} + c\sigma_{yy}^2 + 2d\sigma_{xx} + 2e\sigma_{yy} + l\sigma_{xy}^2 + m\sigma_{xz}^2 + n\sigma_{yz}^2)_j = 1. \quad (1)$$

Здесь $a = -1/(\sigma_{xx}^{ut}\sigma_{xx}^{uc}), \dots, n = 1/(\sigma_{yz}^u)^2$, индекс u относится к предельным, индекс t – к растягивающим, c – к сжимающим, напряжениям; оси системы $(xyz)_j$ совпадают с осями ортотропии j -го слоя, $z_j \perp S_0$.



На рис. 1а оси системы $\xi_1 \xi_2 z$ связаны с оболочкой (пластиной) и являются общими для всех слоев в рассматриваемой точке конструкции, $z \perp S_0$. Учитывая значения угла $\varphi_j = (\xi_1^\wedge, x_j)$, уравнение (1) записываем в системе $\xi_1 \xi_2 z$. Используем жесткопластическую модель деформируемого твердого тела (рис 1б). Согласно ассоциированному с поверхностью прочности закону деформирования, определяем скорости деформаций $\dot{\varepsilon}_{11}^j, \dots, \dot{\varepsilon}_{32}^j$ (соотношения теории течения); решаем полученные соотношения относительно компонент тензора напряжения $\sigma_{11}^j, \dots, \sigma_{32}^j$. Совместная работа слоев в составе пакета учитывается следующими гипотезами кинематического характера:

$$\dot{\varepsilon}_i = \dot{\varepsilon}_i + z \dot{\varepsilon}_i; 2\dot{\varepsilon}_{\alpha 3}^j = \dot{\gamma}_{\alpha j}. \quad (2)$$

Здесь $\alpha = \overline{1, 2}$; $\dot{\varepsilon}_\alpha \equiv \dot{\varepsilon}_{\alpha\alpha}$, $\dot{\varepsilon}_3 \equiv \dot{\varepsilon}_{12}$; $\dot{\varepsilon}_\alpha \equiv \dot{\varepsilon}_{\alpha\alpha}$, $\dot{\varepsilon}_3 \equiv \dot{\varepsilon}_{12}$; $\dot{\varepsilon}_\alpha \equiv \dot{\varepsilon}_{\alpha\alpha}$, $\dot{\varepsilon}_3 \equiv \dot{\varepsilon}_{12}$. Эти выражения подставляем в формулы для напряжений. Суммируя напряжения и их моменты относительно поверхности S_0 по толщине, получаем систему параметрических уравнений предельной поверхности для тонких слоистых композитных оболочек и пластин в системе $\xi_1 \xi_2 z$:

$$T_i = \sum_{j=1}^n \left[0.5 \sum_{k=1}^3 \delta_{ik}^j (I_{1j} \dot{\varepsilon}_k + I_{2j} \dot{\varepsilon}_k) - \Delta_{ij} h_j \right] / \Delta_j;$$

$$M_i = \sum_{j=1}^n \left[0.5 \sum_{k=1}^3 \delta_{ik}^j (I_{2j} \dot{\varepsilon}_k + I_{3j} \dot{\varepsilon}_k) - \Delta_{ij} h_j z_j \right] / \Delta_j; i = \overline{1, 3}; \quad (3)$$

$$Q_{31} = 0.25 \sum_{j=1}^n (N_j \dot{\gamma}_{1j} - M_j \dot{\gamma}_{2j}) I_{1j} / \theta_j; \quad Q_{32} = 0.25 \sum_{j=1}^n (K_j \dot{\gamma}_{2j} - M_j \dot{\gamma}_{1j}) I_{1j} / \theta_j.$$

Здесь $T_\alpha \equiv T_{\alpha\alpha}$, $\alpha = \overline{1, 2}$ (мембранные силы растяжения-сжатия); $M_\alpha \equiv M_{\alpha\alpha}$ (изгибающие моменты); $T_3 \equiv T_{12}$ (мембранная сдвигающая сила); $M_3 \equiv M_{12}$ (крутящий момент); Q_{31} , Q_{32} – поперечные силы; h_j – толщина j -го слоя; z_j – аппликата точки срединной поверхности j -го слоя (в системе $\xi_1 \xi_2 z$). Интегралы I_{ij} в (3) вычисляются согласно выражению

$$I_{ij} = \int_{z_{1j}}^{z_{2j}} \frac{z^{i-1}}{\lambda_j} dz; \quad i = \overline{1,3}. \quad (4)$$

Здесь $\dot{\lambda}(\dot{e}_1, \dots, \dot{\gamma}_2) \geq 0$ – скалярная величина. В (3) параметрами являются отношения скоростей обобщенных перемещений $\dot{e}_1, \dot{e}_2, \dot{e}_3, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$. Уравнения предельной поверхности для однородных изотропных оболочек и пластин, аналогичные (3), впервые были предложены А.А. Ильюшиным.

В том случае, когда в композитном материале отсутствуют физические границы между слоями (например, в железобетоне), слои вводим в рассмотрение искусственно, с учетом характера армирования материала. Соответствующие прочности армированных слоев в железобетоне определяем, используя подходы Фойхта (однородность деформаций) и Рейсса (однородность напряжений).

Соискателем разработан алгоритм, реализована соответствующая программа для ЭВМ, с использованием которых можно, с удовлетворительной точностью, построить искомые сечения гиперповерхности (3).

В третьем разделе диссертации разрабатывается оригинальный метод жестких элементов и обобщенных линий разрушения (МЖЭиОЛР). Этот метод является вариантом кинематического метода теории предельного равновесия и развитием метода цилиндрических шарниров текучести для пластин, линий сосредоточенных пластических деформаций для оболочек, предложенных в работах А.Р. Ржаницына, метода обобщенных линий текучести, развитого М. Янасом. Суть метода заключается в следующем.

Пусть тонкая оболочка (пластина) нагружена внешними силами $p_i = \mu p_i^0 + p_i^1$, где p_i^0, p_i^1 являются функциями только пространственных координат, μ – монотонно возрастающий параметр; способ закрепления оболочки исключает возможность ее перемещений и поворотов как це-

ликом жесткого тела. Необходимо определить предельное значение μ_0 параметра внешнего нагружения, когда оболочка становится механизмом хотя бы с одной степенью свободы.

Если разрушение оболочки происходит вдоль отдельных бесконечно тонких слоев, перпендикулярных поверхности приведения S_0 , а области между ними остаются "жесткими", то уравнение равновесия в форме Лагранжа имеет следующий вид:

$$\sum_{k=1}^m \int_{l_k} N dl = \mu \int_S p_i^0 v_i dS + \int_S p_i^1 v_i dS. \quad (5)$$

Здесь l_k – длина k -ой линии разрушения; m – число линий разрушения; S – площадь поверхности приведения сил; N – мощность внутренних обобщенных сил, приходящаяся на единицу длины линии разрушения; v_i – компоненты вектора скорости движения точки оболочки, где приложена сила p_i .

Определение мощности внешних нагрузок (т.е. правой части уравнения (5)) можно осуществить с использованием следующей формулы:

$$\dot{A} = \mu \sum_{j=1}^{n_1} (\vec{F}_j^0 \vec{v}_j + \vec{M}_j^0 \vec{\omega}_j) + \sum_{j=1}^{n_2} (\vec{F}_j^1 \vec{v}_j + \vec{M}_j^1 \vec{\omega}_j). \quad (6)$$

Здесь j – номер жесткого элемента; n_1 – число жестких элементов, на которые действуют нагрузки, зависящие от параметра μ ; n_2 – число жестких элементов, на которые действуют нагрузки, не зависящие от параметра μ ; \vec{F}_j^0, \vec{F}_j^1 – главные вектора, \vec{M}_j^0, \vec{M}_j^1 – главные моменты (относительно полюса B_j j -го элемента) соответствующих внешних сил, приложенных к j -му жесткому элементу; \vec{v}_j – скорость поступательного движения полюса B_j j -го жесткого элемента; $\vec{\omega}_j$ – скорость вращения j -го элемента.

На рис. 2 изображены два смежных жестких элемента оболочки с полюсами в точках А и В соответственно, и линия разрушения O_1O_2

между этими элементами. Разрывы скоростей поступательных перемещений $\Delta \vec{v}_1$ (в точке O_1), $\Delta \vec{v}_2$ (в точке O_2) и вращений жестких элементов А и В $\Delta \vec{\omega}$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned}\Delta \vec{v}_1 &= \vec{v}_B + \vec{\omega}_B \times \overrightarrow{BO_1} - \vec{v}_A - \vec{\omega}_A \times \overrightarrow{AO_1}; \\ \Delta \vec{v}_2 &= \vec{v}_B + \vec{\omega}_B \times \overrightarrow{BO_2} - \vec{v}_A - \vec{\omega}_A \times \overrightarrow{AO_2}; \\ \Delta \vec{\omega} &= \vec{\omega}_B - \vec{\omega}_A.\end{aligned}\quad (7)$$

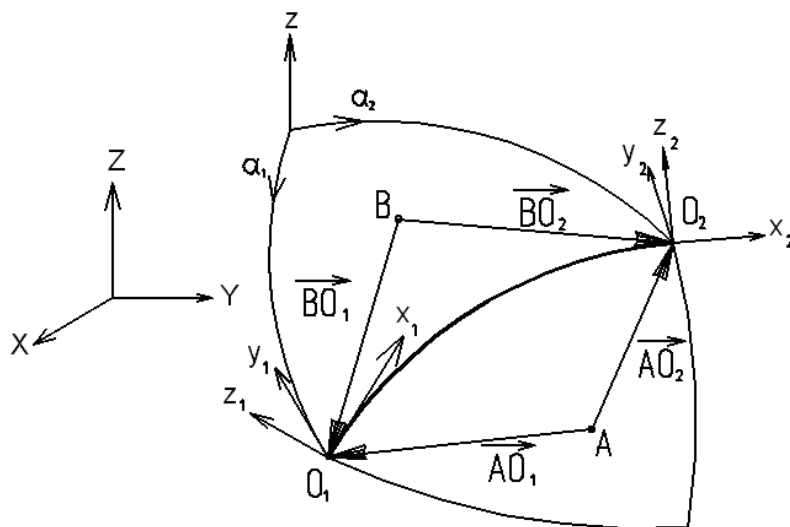


Рис. 2

Мощности погонных внутренних сил \vec{R}_1 , \vec{R}_2 и моментов \vec{M}_1 , \vec{M}_2 в точках O_1 и O_2 линии разрыва O_1O_2 соответственно (рис. 2), развиваемые ими на разрывах скоростей соответствующих перемещений и поворотов (7), определяются выражениями:

$$N_1 = \vec{R}_1 \cdot \Delta \vec{v}_1 + \vec{M}_1 \cdot \Delta \vec{\omega}; \quad N_2 = \vec{R}_2 \cdot \Delta \vec{v}_2 + \vec{M}_2 \cdot \Delta \vec{\omega}. \quad (8)$$

Левую часть (5) запишем в следующем виде:

$$\sum_{k=1}^m \int_{l_k} N dl = \sum_{k=1}^m 0.5(N_{1k} + N_{2k}) l_k. \quad (9)$$

Предельную поверхность аппроксимируем выпуклым многогранником, i -ая вершина которого определяется вектором $\{\vec{R}_i^*, \vec{M}_i^*\}^T$, $i = \overline{1, k}$, k —число вершин аппроксимирующего многогранника. Тогда ра-

венства (8) могут быть аппроксимированы следующей системой неравенств:

$$N_1 \geq \vec{R}_{1i}^* \Delta \vec{v}_1 + \vec{M}_{1i}^* \Delta \vec{\omega}, \quad i = \overline{1, k_4}; \quad N_2 \geq \vec{R}_{2i}^* \Delta \vec{v}_2 + \vec{M}_{2i}^* \Delta \vec{\omega}, \quad i = \overline{1, k_5}. \quad (10)$$

Здесь k_4, k_5 – числа вершин предельных многогранников.

Теперь задачу можно сформулировать в виде задачи линейного программирования: найти $\min \mu^+$, где

$$\mu^+ = 0.5 \sum_{k=1}^m (N_{1k} + N_{2k}) l_k - \sum_{j=1}^{n_2} (\vec{F}_j^1 \vec{v}_j + \vec{M}_j^1 \vec{\omega}_j), \quad (11)$$

$$\text{при условии} \quad \sum_{j=1}^{n_1} (\vec{F}_j^0 \vec{v}_j + \vec{M}_j^0 \vec{\omega}_j) = 1 \quad (12)$$

и при соблюдении ограничений вида (10). Аналогичными (10) неравенствами могут быть учтены и условия опирания оболочки (пластины).

Окончательная задача линейного программирования определяется в глобальной системе координат XYZ .

В общем случае, вдоль рассматриваемой линии разрушения учитываем работу всех внутренних силовых факторов. Линии опирания оболочки (пластины) рассматриваются как возможные линии разрушения. В зависимости от того, какие из реакций опор не совершают работу, допускаются к рассмотрению 32 варианта краевых условий (в том числе – свободный край). Между отдельными частями оболочки (пластины) могут быть конструктивные шарниры, где те или иные внутренние силовые факторы равны нулю (не совершают работу).

В диссертации принята гипотеза, что обобщенная линия разрушения $O_1 O_2$ на поверхности S_0 является самой короткой плоской линией между точками O_1 и O_2 . Соискателем разработан алгоритм и реализована соответствующая программа для ЭВМ, позволяющие численное построение (с заданной точностью) кратчайшей плоской линии между двумя рассматриваемыми точками O_1 и O_2 на поверхности S_0 .

В четвертом разделе приведены некоторые результаты расчетов и их анализ. Большое внимание уделено подтверждению достоверности результатов. Например, для стальной круглой пластины, шарнирно опертой по контуру и нагруженной в центре сосредоточенной силой, получен результат $\min \mu^+ = 0.00286$ МН. В книге А.Р. Ржаницына ([76] из диссертации) приведен соответствующий результат, равный 0.00297 МН (относительная разница составляет 3.7%).

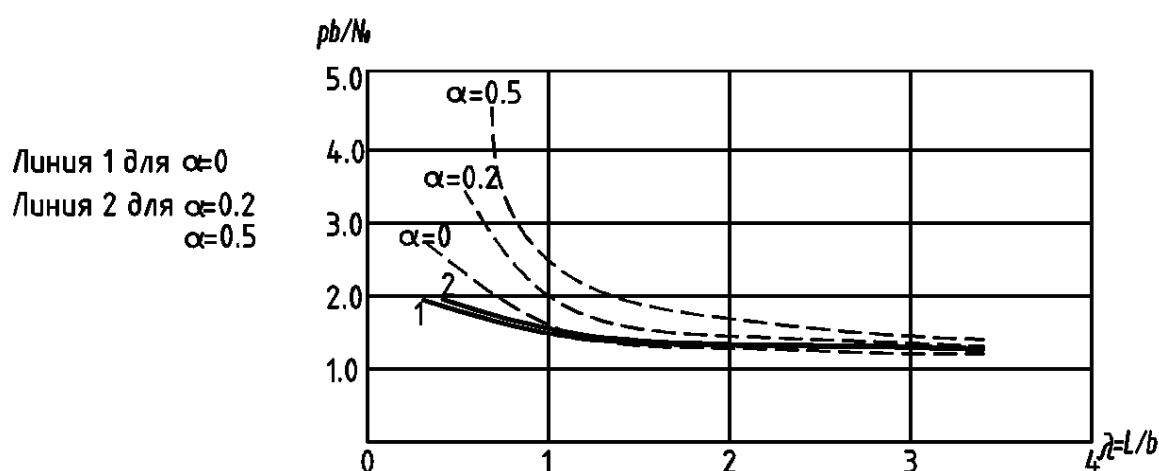


Рис. 3

Для полукруглой цилиндрической оболочки с разными прочностями материала на растяжение и сжатие, которая рассмотрена в работе [64] (диссертация) нами получены графики 1 и 2 на рис. 3; штриховые линии на этом рисунке заимствованы из вышеупомянутой работы. Как видно, для коротких оболочек верхние оценки для соответствующих предельных нагрузок, полученные нами, существенно ниже, чем аналогичные расчетные результаты других авторов.

Произведено сравнение наших расчетных результатов для железобетонного полусферического купола Б-б-3 с соответствующими экспериментальными данными из книги А.М. Овечкина ([63], диссертация). Оболочка свободно опирается по экватору и нагружена сосредоточенной силой, приложенной на полюсе. Экспериментальное значение предельной нагрузки равно 13 т. В результате расчета согласно предлагаемой

нами методике, получено значение $\min \mu^+ = 13.08$ т. Как видно, результат расчета практически совпадает с соответствующими экспериментальным значением разрушающей нагрузки.

В диссертации приведены также другие примеры, подтверждающие достоверность получаемых расчетных результатов.

На рис. 4 изображены некоторые проекции части сферы с вырезами. Радиус срединной поверхности – 3 м, стрела подъема – 2.5 м, на высоте 1.4 м имеются 3 горизонтальных отверстия размерами 0.5х0.3 м, 1.5х0.3 м, 0.5х0.3 м. Напротив отверстий вырезана входная дверь размерами 0.9х2.1 м. Оболочка шарнирно оперта по нижней параллели. Толщина оболочки 120 мм, арматура диаметром 10 мм равномерно уложена вдоль параллелей и перпендикулярно им (с шагом 100 мм) в растянутой и сжатой зонах. Условно считаем, оболочка состоит из 5 совместно работающих слоев с толщинами $h_1 = h_5 = 15$ мм; $h_2 = h_4 = 10$ мм; $h_3 = 70$ мм; углы ориентации слоев: $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \varphi_5 = 0^\circ$.

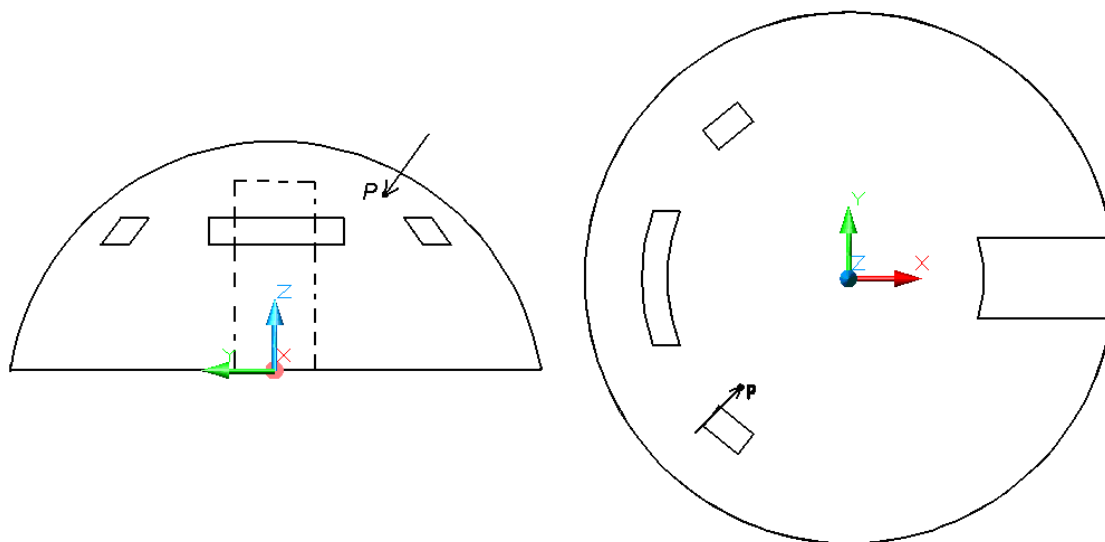


Рис. 4

В пространстве напряжений поверхности прочности для слоев описываются следующими уравнениями:

для слоев 1, 3, 5:

$$17.45\sigma_{xx}^2 - 8.71\sigma_{xx}\sigma_{yy} + 17.45\sigma_{yy}^2 + 8.22\sigma_{xx} + 8.22\sigma_{yy} + 76.11(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) = 1 \quad (\text{МПа}^2);$$

для слоев 2, 4:

$$0.744\sigma_{xx}^2 - 0.157\sigma_{xx}\sigma_{yy} + 17.45\sigma_{yy}^2 + 0.336\sigma_{xx} + 8.22\sigma_{yy} + 64.93(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) = 1 \quad (\text{МПа}^2).$$

На рис. 5 приведены сечения гиперповерхности прочности некоторыми координатными плоскостями в пространстве внутренних усилий, построенные по нашей методике. Здесь силы – в МН/м, моменты – в МНм/м. Внешняя сосредоточенная сила P приложена в точке $P (-1.2167; -1.2167; 1.9575)$ (рис. 4), направлена по внутренней нормали к поверхности оболочки. На рисунках 6, 7 приведены различные возможные схемы линий разрушения рассматриваемой оболочки. С применением нашей методики получены следующие соответствующие значения $\min \mu^+$: для схемы на рис. 6а – 2.604 МН, для схемы на рис. 6б – 3.516 МН, для схемы на рис. 7 – 1.932 МН. Были рассмотрены и другие возможные схемы разрушения оболочки. В результате был сделан вывод, что виртуальная схема на рис. 7 находится ближе других схем (из числа рассмотренных) к действительному механизму разрушения.

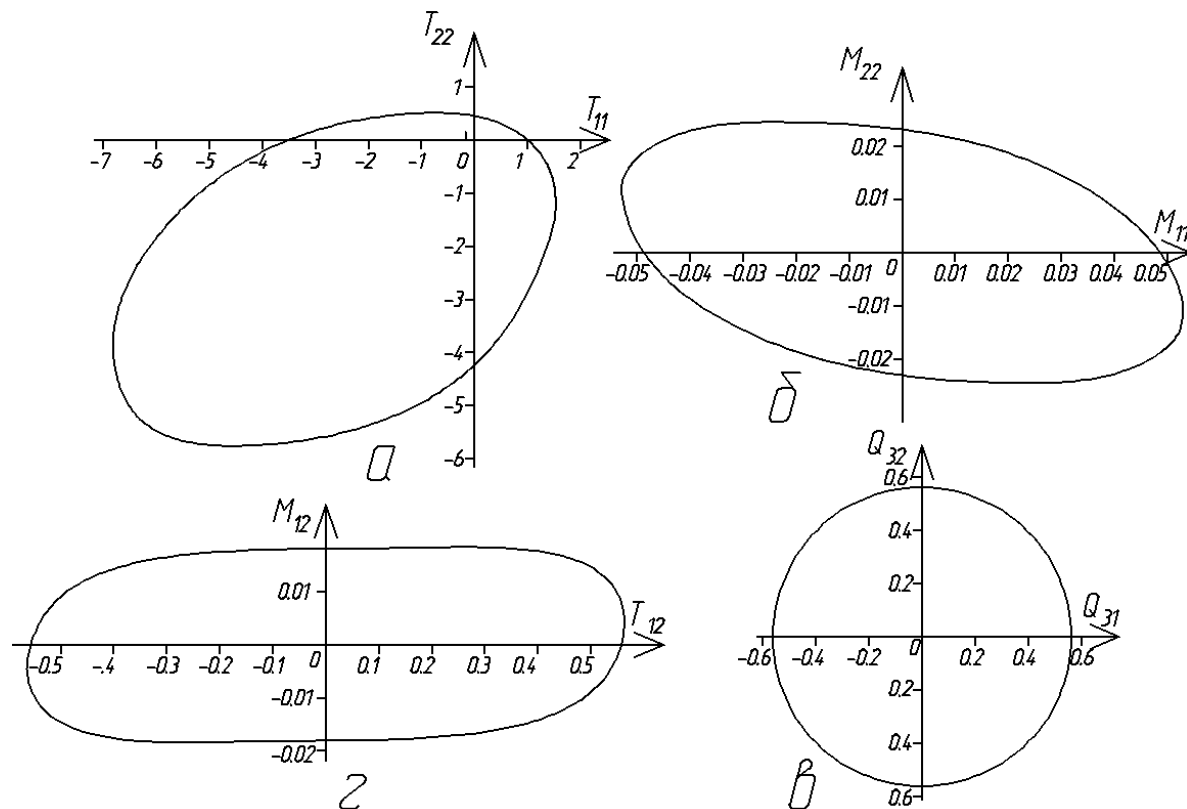
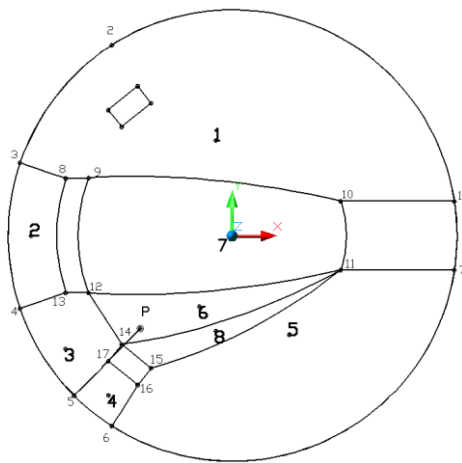
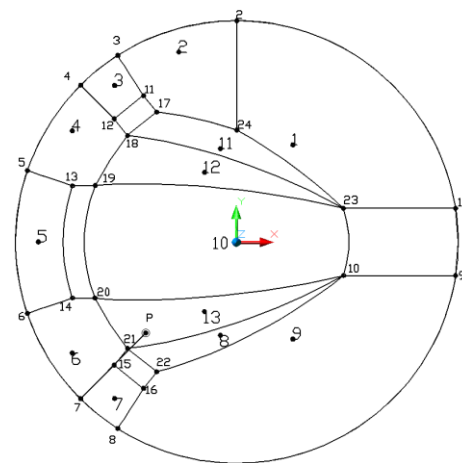


Рис. 5



(a)



(б)

Рис. 6

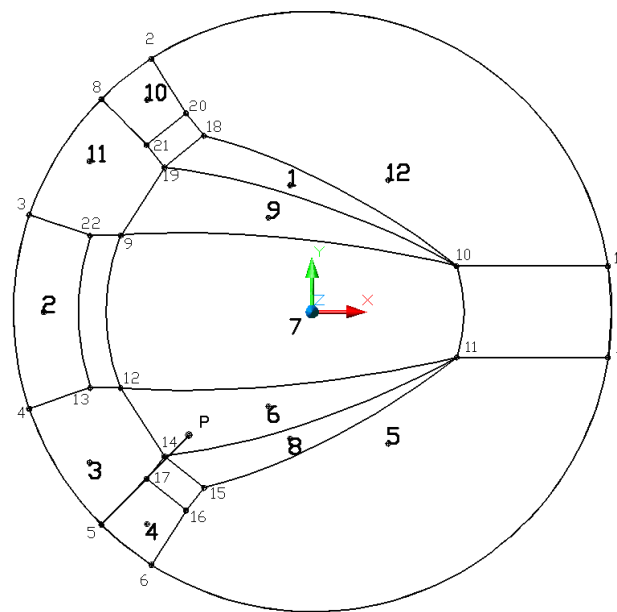
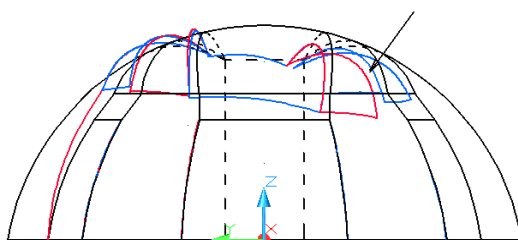
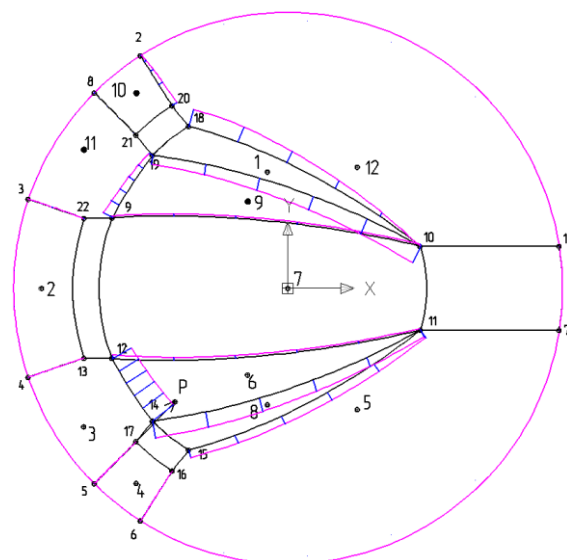


Рис. 7



(a)



(б)

Рис. 8

На рис. 8а приведена картина распределения скоростей перемещений (соответствует схеме на рис. 7), а на рис. 8б – соответствующая эпюра скоростей диссипации внутренней энергии N . Были решены и другие варианты рассматриваемой задачи. Например, увеличение процента армирования путем уменьшения шага арматуры вдвое, в окрестностях точек №№ 9-12, 14, 15, 18, 19 (см рис. 7, 8б), привело к увеличению $\min \mu^+$ на 14.5% ($\min \mu^+$ достигается при схеме на рис. 7). Увеличение диаметра арматуры до 15 мм (при шаге 100 мм) в областях тех же точек 9-12, 14, 15, 18, 19 привело к увеличению $\min \mu^+$ на 10.3% (по сравнению с исходным вариантом). Схема разрушения соответствует рис. 7. Для варианта опоры в виде жесткого защемления получено значение $\min \mu^+ = 1.996$ МН. Хотя это значение отличается только на 2.2% (по сравнению со значением $\min \mu^+$ для случая шарнирного опирания), но картина распределения скоростей диссипации существенно изменяется (появляется диссипация вдоль некоторых участков линии опирания).

Для варианта вертикальной силы, приложенной в полюсе оболочки (остальные исходные данные совпадают с соответствующими данными первоначального варианта) получено значение $\min \mu^+ = 4.244$ МН. Рассмотрена также задача рационального армирования купола (в тех областях оболочки, где скорость диссипации N относительно большая, процент армирования увеличивается, а в тех областях, где N мала или равна нулю - уменьшается). Показана возможность целенаправленного изменения схемы армирования оболочки, с тем, чтобы увеличить ее несущую способность при ее рациональном армировании.

В приложении к диссертации приводится пример расчета реальной железобетонной конструкции.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработана уточненная методика определения несущей способности тонких армированных пластин и оболочек на основе теории предель-

ного равновесия. Эта методика позволяет решать рассматриваемые задачи при следующих исходных условиях и требованиях:

- оболочки и пластины могут иметь сложную геометрическую форму, в том числе – изломы по некоторым линиям, внутренние и внешние (около краев) произвольные вырезы;
- допускаются к рассмотрению всевозможные краевые условия (условия опирания) оболочек и пластин;
- статическая внешняя нагрузка может иметь произвольную конфигурацию;
- в общем случае методика позволяет учет работы всех внутренних силовых факторов;
- методика позволяет учитывать произвольный характер армирования материала (единственное ограничение – арматура должна располагаться «параллельно» поверхности приведения S_0).

В качестве примера оболочек из армированных материалов рассмотрены железобетонные оболочки.

2. Построены уточненные кривые прочности для армированных материалов.
3. Созданы эффективные алгоритмы, позволяющие реализовать разработанную методику определения верхней оценки несущей способности тонких (армированных и неармированных) пластин и оболочек.
4. Разработан и реализован комплекс соответствующих программ для ЭВМ, получены численные результаты расчетов, произведено сравнение этих результатов с соответствующими известными результатами (в том числе – экспериментальными), показана достоверность численных результатов.

Основные выводы диссертации заключаются в следующем:

1. Разработанная методика, алгоритмы, программы для ЭВМ позволяют решать реальные, с точки зрения практики проектирования, задачи

расчета на прочность тонких армированных и неармированных пластин и оболочек, получать численные результаты, удовлетворительно согласующиеся с соответствующими экспериментальными и расчетными результатами других авторов.

2. Уточнение решений (по сравнению с имеющимися аналогичными методиками) достигается за счет: учета работы всех внутренних усилий; уточнения сечений используемых гиперповерхностей прочности; уточнения механизма разрушения путем варьирования количества и положений обобщенных линий разрушения конструкции.
3. Использование параметрических уравнений (3) позволяет учитывать работу всех внутренних усилий. Математические соотношения упрощаются, а задачи, которые могут быть решены с их использованием, могут иметь более сложный характер, чем решаемые известными аналогичными методиками. Упрощается внешний вид основных соотношений, они становятся алгоритмичными, ориентированными на использование современных ЭВМ. Облегчается учет различных условий опирания конструкции.

Оригинальная часть диссертации с достаточной полнотой отражена в следующих печатных работах:

В рецензируемых журналах:

1. *Исламов, К.Ф.* Рациональное армирование железобетонного купола с вырезами / *К.Ф. Исламов, Э.С. Сибгатуллин* // Вестник Тамбовского политехнического университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов. – 2006. – Том 11. – Выпуск 4. – С. 577-582.

Публикации в сборниках научных трудов, материалах конференций

2. Сибгатуллин, Э.С. Определение несущей способности прямоугольных железобетонных плит / *Э.С. Сибгатуллин, К.Ф. Исламов* // Сборник материалов конференций: Межвузовская научно-методическая конференция (заочная) «Преподавание языков в технических вузах – проблемы и решения», Межвузовская научно-методическая конферен-

- ция «Научно-исследовательская деятельность студентов – первый шаг в науку», Набережные Челны. – 2005. – С. 270-273.
3. Сибгатуллин, Э.С. Определение несущей способности композитных оболочек. / Э.С. Сибгатуллин, *К.Ф. Исламов* // Студенчество. Интеллект. Будущее, межвузовская молодеж. конф. (2005; Наб. Челны): сборник материалов, Набережные Челны. – 2005. – С. 286-289.
 4. Сибгатуллин, Э.С. Определение несущей способности элементов конструкций кинематическим методом теории предельного равновесия / Э.С. Сибгатуллин, *К.Ф. Исламов* // «Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация». Набережные Челны, №8 2005 г. <http://kampi.ru/sets/>.
 5. *Исламов, К.Ф.* Использование метода Ньютона для определения плоской линии минимальной длины между двумя рассматриваемыми точками на поверхности оболочки / *К.Ф. Исламов* // Проблемы строительного комплекса России: Материалы X Международной научно-технической конференции при X Международной специализированной выставке «Строительство. Коммунальное хозяйство 2006». – Т.2 / Редкол.: Агапчев В.И. и др. – Уфа: изд-во УГНТУ. – 2006. – С. 13-15.
 6. Сибгатуллин, Э.С. Определение несущей способности цилиндрической оболочки с использованием кинематического метода. Часть I. Основные соотношения [Электронный ресурс] / Э.С. Сибгатуллин, *К.Ф. Исламов* // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. Набережные Челны. – 2006. – №6. <http://kampi.ru/sets/>.
 7. Сибгатуллин, Э.С. Определение несущей способности цилиндрической оболочки с использованием кинематического метода. Часть II. Использование метода Ньютона для определения плоской линии кратчайшей длины на поверхности оболочки [Электронный ресурс] / Э.С. Сибгатуллин, *К.Ф. Исламов* // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. Набережные Челны. – 2006. – №6. <http://kampi.ru/sets/>.
 8. Сибгатуллин, Э.С. Минимизация целевой функции при построении сечений предельной гиперповерхности прочности [Электронный ре-

курс] / Э.С. Сибгатуллин, К.Ф. Исламов // Образование и наука Зака-
мья Татарстана. - Набережные Челны. – 2006. – №3.

<http://kama.opennet.ru:3128/site/>.

9. Исламов, К.Ф. Определение несущей способности композитных оболочек и пластин кинематическим методом теории предельного равнове-
сия / К.Ф. Исламов // Материалы 58-й республиканской научной
конференции. Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. -
Казань: КазГАСУ. – 2006. – С. 37-42.
10. Исламов, К.Ф., Сибгатуллин, Э.С., Тимергалиев, С.Н. Определение
несущей способности композитных оболочек и плит с использованием
оригинального варианта кинематического метода / К.Ф. Исламов, Э.С.
Сибгатуллин, С.Н. Тимергалиев // Проектирование и исследование
технических систем. Набережные Челны. – 2006. – №8. – С. 8-10.
11. Исламов, К.Ф. Определение несущей способности железобетонного
купола с вырезами / К.Ф. Исламов, Э.С. Сибгатуллин // Известия вузов.
Северо-Кавказский регион. Технические НАУКИ. Приложение №10. –
2006 г. – С. 78-81.

Корректурa автора

Подписано в печать	27.04.2007	Формат 60x84/16
Заказ 234	Печать RISO	Усл.-печ.л. 1.0
Тираж 100 экз.	Бумага тип №1	
Типография «Ренессанс»		
423810, г. Наб. Чедны, д. 30/18, каб 5-6		

